

土柱法とデータ同化を用いた水分特性曲線推定手法の改良と妥当性評価

鹿児島大学工学部 学生会員 〇亀川裕樹，河野優樹，高田雄大
鹿児島大学学術研究院理工学域工学系 正会員 伊藤真一，酒匂一成

1. はじめに

不飽和地盤の浸透挙動を定量的に評価する上で、土中の水分状態の把握が必要であり、そのためには、水分特性曲線の推定が重要である。水分特性曲線は保水性試験などによって得られるが、試験時間が長いことや平衡状態の判断が難しいことなどの課題点が挙げられる。そこで、河野ら¹⁾は簡易に実施可能な土柱法に着目し、土柱法とデータ同化を組み合わせた水分特性曲線推定手法を提案し、その有用性を明らかにした。しかし、河野らの提案手法にはいくつかの課題も残されている。図-1 は河野らが作製した試験装置の概要を示しているが、供試体タンクと水タンクをホースで繋いでいるため、土試料によっては、水タンク側からの排水が始まるタイミングと供試体へ水が流入するタイミングに違いが生じる場合があった。また、試験装置自体も大きいため、1回の試験で10kg以上の試料が必要となる。さらに、既往の研究¹⁾では、他の保水性試験結果との比較に基づく提案手法の妥当性評価が行われていないという課題もあった。本研究では、河野らが作製した試験装置を改良して水分特性曲線の推定を行うとともに、推定された水分特性曲線の妥当性評価も試みる。

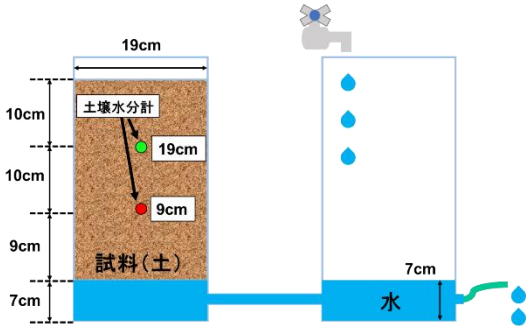


図-1 河野らの作製した試験装置

2. 改良した土柱法の概要と試験結果

図-2 は本研究で改良した土柱法試験装置の概要図を示している。供試体部分と水槽部分が一体になるように試験装置を作製することで、水槽部分から水がオーバーフローした時点で試験開始となるように改良した。また、試験装置の体積を河野らの作製した装置の約 40%になるように設計することで、試験実施に必要な土試料を少なくした。自由水面上から 5cm，10cm の高さに土壌水分計（EC-5）を横向きに設置して体積含水率を計測した。

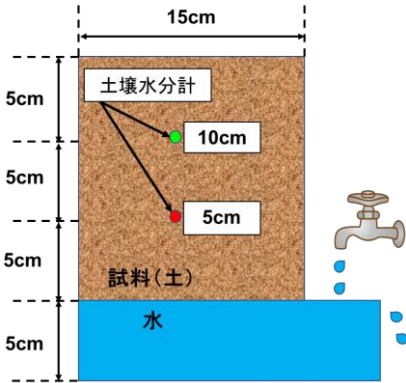


図-2 改良型土柱法の概要図

表-1 は本研究で用いた 4 つの試料の物性値と供試体作製条件を示している。この 4 つの試料を用いて土柱法による試験を行った。図-3 は一例として硅砂の試験結果を示しており、解析には試験開始後 60 分間のデータを使用した。

表-1 物性値と供試体作製条件

試験試料		硅砂	豊浦砂	マサ土	東俣シラス
土粒子密度(ρ_s)	Mg/m ³	2.61	2.64	2.75	2.59
間隙比(e)	-	0.75	0.76	0.6	0.97
初期飽和度(S_e)	%	5.0	25.0	35.0	30.0

3. 解析手法

数値解析シミュレーションとして、不飽和・飽和浸透流解析を行った。支配方程式として Richards 式を使用し、水分特性曲線モデルは式(1)に示す van Genuchten モデル，不飽和透水係数モデルは式(2)に示す Mualem モデルを用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ \frac{1}{1 + (-\alpha \cdot \psi)^n} \right\}^{1 - \frac{1}{n}} \tag{1}$$

$$k(\psi) = k_s \cdot S_e^{0.5} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1 - \frac{1}{n}} \right\}^2 \tag{2}$$

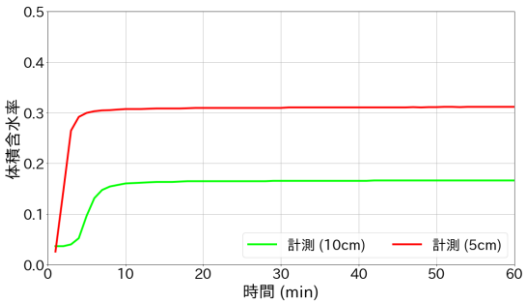


図-3 試験結果（硅砂）

ここで、 S_e は有効飽和度、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は残留体積含水率、 α 、 n はモデルの形状を決定するパラメータである。本研究では、式(1)、式(2)に含まれる5つの未知パラメータ(θ_s 、 θ_r 、 α 、 n 、 k_s)の事後分布をデータ同化により推定する。データ同化には、融合粒子フィルタ(MPF)を使用した。MPFの詳細については既往の論文を参照されたい²⁾。

4. 解析結果と妥当性の検討

合計 500 個の粒子を用いてデータ同化を行なった。図-4は、珪砂を用いた場合のデータ同化結果を示している。実線が計測データであり、破線が平均値 μ 、点線が標準偏差 $\pm\sigma$ の範囲を示している。データ同化結果は計測データを良好に再現できていることがわかる。図-5は水分特性曲線の事前分布と事後分布を示している。500個の粒子を用いているため500本の水分特性曲線が描かれている。データ同化前の(a)事前分布は一様乱数でパラメータの組み合わせを作成したため水分特性曲線がばらついてはいるが、データ同化を行うことで(b)事後分布のような計測データを再現できる水分特性曲線を推定することができている。

次に、データ同化によって推定された水分特性曲線の妥当性を評価するために、加圧板法によって得られた水分特性曲線との比較を行なった。間隙比を合わせた試験をそれぞれ行って本研究の提案手法の妥当性を評価した。図-6は豊浦砂を用いた場合の比較結果を示している。データ同化によって得られた500本の水分特性曲線は平均値 μ と標準偏差 $\pm\sigma$ の範囲で表現している。この結果から、データ同化によって推定された水分特性曲線は、加圧板法の試験結果と概ね同様の水分特性曲線を推定できているため、改良型土柱法の妥当性を示すことができたと考えられる。今後は、他の試料を用いた場合の妥当性評価も行う予定である。

5. おわりに

本研究では、既往の研究における土柱法試験装置を改良してデータ同化による水分特性曲線の推定を行うとともに、推定された水分特性曲線の妥当性評価も試みた。その結果、改良した試験装置を用いた場合も、粒径の異なる4つの土試料を用いて得られた計測データを再現可能な水分特性曲線をそれぞれ推定できることがわかった。さらに、本研究の提案手法によって推定された豊浦砂の水分特性曲線は加圧板法によって得られたそれと概ね一致する結果を得ることができ、提案手法の妥当性を確認することができた。今後は豊浦砂以外の試料を用いた場合における提案手法によって推定された水分特性曲線の妥当性も確認する必要がある。

参考文献

- 1) 河野優樹ほか：データ同化を導入した土柱法による不飽和浸透特性推定手法の提案, Kansai Geo-Symposium 2020, pp.43-48, 2020.
- 2) 伊藤真一ほか：土柱法の計測データに基づくデータ同化により推定された浸透解析モデルの予測性能, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.76, No.4, pp.350-362, 2020.

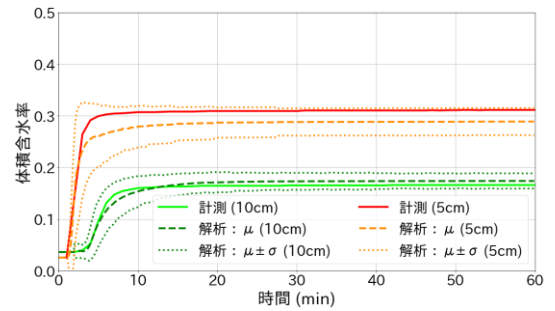
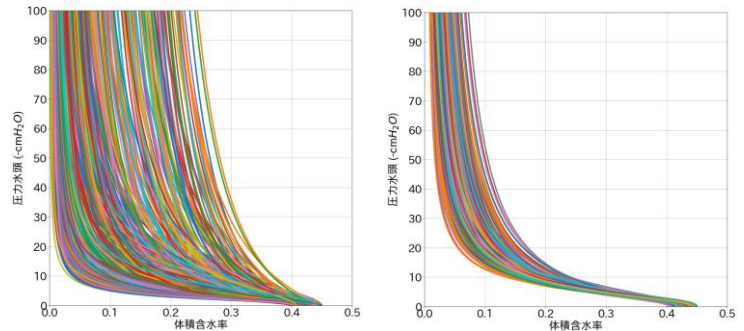


図-4 解析結果



(a) 事前分布

(b) 事後分布

図-5 水分特性曲線

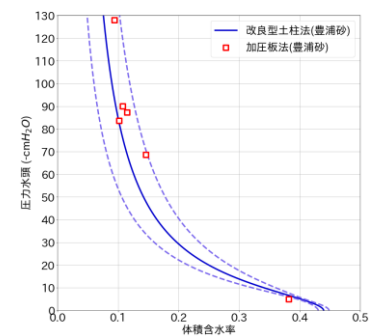


図-6 解析結果